

学校编码：10384

密级_____

学号：22620101151378

九龙江流域水生生态系统服务价值评估

厦门大学

厦门大学

硕士学位论文

九龙江流域水生生态系统服务价值评估

Evaluation of Aquatic Ecosystem Services in the Jiulong
River Watershed

王龙剑

指导教师姓名：陈能汪 副教授

专业名称：环境管理

论文提交日期：2013年5月

论文答辩时间：2013年5月

2013年5月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文,并向主管部门或其指定机构送交学位论文(包括纸质版和电子版),允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据集被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据集进行检索,将学位论文的标题和摘要汇编出版,采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于:

() 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文,
于 年 月 日解密,解密后适用上述授权。

() 2. 不保密,适用上述授权。

(请在以上相应括号内打“ ”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文,未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的,默认为公开学位论文,均适用上述授权。)

声明人(签名):

年 月 日

目录

摘要.....	I
Abstract.....	III
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 流域生态系统服务研究进展.....	2
1.2.1 生态系统服务的研究方法.....	2
1.2.2 流域生态系统服务的研究动态.....	3
1.2.3 流域水生态系统服务价值评估研究进展.....	8
1.3 问题的提出.....	10
1.4 研究目标、内容与技术路线.....	11
1.4.1 研究目标.....	11
1.4.2 研究内容.....	11
第二章 流域生态系统服务重要概念分析.....	13
2.1 流域生态系统服务的内涵.....	13
2.2 流域生态系统服务的分类.....	14
2.3 流域生态系统服务评估与流域水环境综合管理的逻辑联系.....	15
2.4 小结.....	18
第三章 基于 GIS 的流域生态系统服务价值空间评估方法.....	19
3.1 空间评估技术框架.....	19
3.2 空间评估关键步骤.....	19
3.3 流域水生态系统服务价值空间评估的方法框架.....	20
3.3.1 水资源供给服务.....	20
3.3.2 河流直接利用服务.....	21
3.3.3 调节性服务.....	22
3.4 小结.....	24
第四章 河流系统营养盐污染削减价值空间评估方法.....	27
4.1 营养盐污染削减过程.....	27
4.1.1 氮素的削减过程.....	28

4.1.2 磷素的削减过程.....	30
4.2 氮污染削减物质量计算与空间表达.....	31
4.2.1 物质平衡法.....	31
4.2.2 营养盐释放法（脉冲添加实验）.....	32
4.2.3 N_2/N_2O 通量法.....	33
4.3 氮污染削减物质量的价值化.....	36
4.4 小结.....	37
第五章 九龙江河流系统氮污染削减价值评估	39
5.1 研究区概况.....	39
5.1.1 自然地理.....	39
5.1.2 社会经济.....	40
5.2 数据收集与处理.....	41
5.2.1 河流系统的提取.....	41
5.2.2 基础数据收集与处理.....	42
5.3 河流系统氮污染削减价值空间评估.....	42
5.3.1 评估边界的确定.....	42
5.3.2 评估指标的确定.....	42
5.3.3 河流氮污染削减物质量评估.....	42
5.3.4 河岸带氮污染削减量评估.....	49
5.3.5 价值化系数的确定.....	50
5.4 评估结果及讨论.....	50
5.4.1 氮污染削减物质量及其空间分布.....	50
5.4.2 氮污染削减通量及其空间分布.....	53
5.4.3 氮污染削减价值及其空间分布.....	55
5.4.4 结果汇总及氮污染削减策略分析.....	59
5.5 不确定性分析.....	60
第六章 结论与展望	62
6.1 主要结论.....	62
6.2 创新点.....	62

6.3 研究展望.....	63
参考文献.....	64
附录 硕士期间参加的研究课题、科研活动与发表论文	70
参加的研究课题.....	70
发表论文.....	70
致谢.....	71

厦门大学博硕士学位论文摘要库

Contents

Abstract (in Chinese)	I
Abstract (in English)	III
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Background and research motivation	1
1.2 Watershed ecosystem service research progress	2
1.2.1 Ecosystem service research progress	2
1.2.2 Watershed ecosystem service research trends	3
1.2.3 Aquatic ecosystem service research progress	8
1.3 Questions in research	10
1.4 Objectives, contents and structure of this thesis	11
1.4.1 Objectives	11
1.4.2 Contents	11
1.4.3 Structure of this thesis	11
Chapter 2 Watershed ecosystem service conceptual analysis	13
2.1 Connotation	13
2.2 Classification	14
2.3 Logical relation with integrated watershed management	15
2.4 Conclusions	18
Chapter 3 GIS-based valuation method of watershed ecosystem service	19
3.1 Spatial evaluation technology framework	19
3.2 Key procedures	19
3.3 Method framework of spatial evaluation of aquatic ecosystem service	20
3.3.1 Water resource services	20
3.3.2 River direct-use services	21
3.3.3 Regulated services	22
3.4 Conclusions	24
Chapter 4 Spatial valuation of nutrient retention in river system	27
4.1 Nutrient retention process	27
4.1.1 Nitrogen retention process	28
4.1.2 Phosphorus retention process	30
4.2 Spatial valuation and calculation of amount of nitrogen retention	31

4.2.1 Mass balance approach	31
4.2.2 Nutrient pulse release method.....	32
4.2.3 Denitrification flux method.....	33
4.3 Valuation methods.....	36
4.4 Conclusions.....	37
Chapter 5 GIS-based valuation of nitrogen retention in Jiulong River system.....	39
5.1 Study site descriptions	39
5.1.1 Physical geography	39
5.1.2 Social economy	40
5.2 Data collection and processing	41
5.2.1 Draw river system.....	41
5.2.2 Basic data collection and disposal	42
5.3 Valuation method of nitrogen retention in Jiulong River system.....	42
5.3.1 Evaluation boundary	42
5.3.2 Evaluation indicators	42
5.3.3 Amount of nitrogen retention in river	42
5.3.4 Amount of nitrogen retention in riparian zone.....	49
5.3.5 Valuation of the amount	50
5.4 Results and discussion	50
5.4.1 Spatial distribution of amount of nitrogen retention.....	50
5.4.2 Spatial distribution of nitrogen retention flux.....	53
5.4.3 Spatial distribution of nitrogen retention value	55
5.4.4 Results summary and policy analysis	59
5.5 Uncertainty analysis.....	60
Chapter 6 Conclusion and prospect	62
6.1 Main conclusion.....	62
6.2 Innovative point	62
6.3 Research prospect	63
References.....	64
Appendix.....	70
Acknowledgements.....	71

摘要

随着全球气候变化和人类活动干扰加剧,河流湖库化、水体污染和富营养化等流域性问题日益突出,这些问题已严重影响到流域生态系统服务和区域经济社会可持续发展。开展流域尺度的生态系统服务价值评估,有助于深入认识流域水生态、水环境动态变化及其驱动机制,同时为流域水污染削减方案优化、流域生态补偿等方面提供科学依据。对流域生态系统服务价值进行空间维度分析,可以为流域水环境综合管理提供更有针对性的政策制定依据。

本文在分析流域生态系统服务内涵,理清流域生态系统服务与流域水环境综合管理逻辑联系的基础上,提出基于 GIS (Geographic information system) 的流域水生态系统服务价值的空间评估技术框架;基于生物地球化学过程和生态经济学原理,重点构建了河流系统水质净化(营养盐污染削减)价值空间评估方法;评估了福建省九龙江河流系统氮污染削减价值,并基于评估结果进行水环境管理策略分析。主要的研究成果如下:

(1) 阐述了流域生态系统服务的内涵,应重点考虑以水循环过程和水生态过程为纽带的生态系统产品或服务,其核心价值表现为水资源和水环境在支撑流域社会经济发展、维护生态系统健康、保障生态环境安全等方面的作用。总结国内外流域生态系统服务研究案例,提出流域生态系统服务项目的一级和二级分类体系,确定流域生态系统服务价值评估的主要项目(水质净化、工农业供水、水力发电、水产品等)。理清流域生态系统服务评估与流域水环境综合管理的逻辑联系,为流域系统分析、水质标准实施、污染控制规划、环保资金保障等方面提供理论支持。

(2) 基于营养盐生物地球化学过程分析和生态经济学原理,建立河流系统(包括河流水体和河岸带)氮污染削减“物质量-价值量”空间评估方法模型。其中,物质量的计算方法包括物质平衡法、营养盐释放法和 N_2/N_2O 通量法。氮污染削减价值量评估采用替代成本法,其中扣除了 N_2O 温室气体引起全球变暖所产生的负价值。

(3) 以福建省九龙江流域为例,确定了反硝化去除氮素通量和价值化参数,评估了九龙江河流系统氮污染削减物质量和价值量,实现 GIS 空间分析和可视化表达。通过 N_2/N_2O 通量法估算出九龙江河流系统氮污染削减物质量为 282.3 t/a,

其中河流/库区水体氮污染削减物质量为 81.24 t/a(占河流系统总削减量的 29%), 河岸带氮污染削减物质量为 201.02 t/a(占河流系统总削减量的 71%)。通过替代成本法计算获得九龙江河流系统氮污染削减服务总价值为 0.19×10^8 yuan/a , 产生 N_2O 的负价值为 0.93×10^4 yuan/a。河流单位面积氮污染削减价值较高的地区主要分布在北溪上游(龙岩地区) 和西溪中下游(漳州市)。河岸带单位面积氮污染削减价值空间分布与河岸植被有关 , 人类活动密集的地区 , 河岸植被破坏比较严重 , 氮污染削减价值较小。

(4) 基于评估结果进行水环境管理策略分析。河流系统氮污染削减对于流域水质改善和生态修复起到不容忽视的作用 ; 九龙江河流部分高污染河段的反硝化去除量较大 , 但效率较低。建议从源头上控制人为氮污染源(畜禽养殖、化肥流失和生活污染) 的输入 , 实施相关措施加强河流系统自身氮污染削减作用(如反硝化和生物吸收) , 对九龙江河流植被带进行重构和优化 , 最大程度地提高河流系统的水质净化服务功能 , 以减缓河流-近海富营养化趋势。

关键词：流域生态系统服务；价值评估；氮污染削减；空间分析；河流系统

Abstract

With increased human and climatic perturbation, watersheds experience critical problems such as water pollution, eutrophication, and being lake like reservoir, which seriously affected the river basin ecosystem services and development of sustainable regional socio-economic. Valuation of ecosystem services at basin scale will help our understanding of changes of aquatic systems and associated drivers. This will also provide the scientific basis for optimization of water pollution reduction plan and ecological compensation. Spatial analysis of river basin ecosystem services would make the scientific support to policy-making and integrated basin management more specific.

In this study, the concept of watershed ecosystem services is fully discussed based on an extensive literature review and the role of ecosystem services in watershed management is logically framed. A GIS-based framework is also proposed for evaluation of watershed ecosystem services. Based on biogeochemical process and ecological economy theory, an approach was developed to estimate purification function (i.e., nutrient pollution reduction) and ecological services value of river system (river and riparian zone), which was subsequently applied to a case study in the Jiulong River, southeast China. The main research achievements are as follows:

The concept of watershed ecosystem services is fully elaborated. Ecosystem services based on water cycle and water ecological processes were seriously considered. Their core value was assessed in terms of the positive functions of water resources and water environment on watershed social-economic development, and environment protection. Based on an extensive set of case studies, a first and second-grade classification system of watershed ecosystem services is proposed, the main projects are water purification, industrial and agricultural water supply, hydraulic electrogenerating. These were used to make an evaluation of watershed ecosystem services. Meanwhile, the role of evaluation of ecosystem services in watershed management is logically framed. This provides theoretical support for analysis of watershed ecosystem, implement of water quality standard, plan of pollution control, security of environmental protection funds.

Based analysis of nutrient biogeochemical processes and principles of ecological economics, an “amount to value” spatial evaluation model of nitrogen retention in river system (river and riparian zone) was developed. Methods for mass balance,

nutrient release and denitrification flux were suggested to estimate nitrogen retention, with each one having its own scope of application. Replacement cost method and energy systems theory were also used for evaluation. Both of the evaluation results can be used to make a reference range of nutrient retention value, which should deduct negative value induced by its producing greenhouse gas N_2O .

The nitrogen retention valuation coefficients were determined and subsequently used for evaluating nitrogen retention in the Jiulong River system. Estimates using the denitrification flux method showed the nitrogen retention of the Jiulong River system was 282.3 t/a, which consisted of that of river (81.24 t/a, 29%) and riparian (201.02 t/a, 71%). The results of replacement cost method indicate the value of nitrogen retention is 0.19×10^8 yuan/a, which deducted 0.93×10^4 yuan/a as negative value of N_2O . Based on mapping the values, the value of nitrogen retention per unit water area is higher in the upper reaches of the North Jiulong River and middle and lower reaches of the West Jiulong River. It further shows that the value of the riparian zone is affected by riparian vegetation. Vegetation is destroyed seriously in high populated areas, leading to lower value of nitrogen retention.

This study indicates that the nitrogen retention of a river system plays an important role in improving water quality and restoration. It is critical to control nitrogen input from activities and strengthen efficiency of denitrification and biological uptake. In addition, optimizing riparian vegetation can also be a good way to maximize the value of water quality purification (nitrogen retention) service, further reduce eutrophication.

Key Words: Watershed ecosystem service; Valuation; Nitrogen retention; Space analysis; River system

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

当前人类活动使生态系统面临巨大威胁 (MA, 2003), 有关生态系统服务研究已经成为生态经济学的一个热点领域 (Turner et al., 2003)。特别是Costanza (1997)在《Nature》上发表了题为“ The value of the world's ecosystem services and natural capital ”的文章后,掀起了生态系统服务研究的热潮,在全球、国家、市、县、区域以及流域等不同空间尺度上,针对森林、草地、农田、湿地和海洋等不同生态系统类型开展广泛研究。我国当前处于经济发展与生态环境矛盾最为突出的特殊时期。这一时期,该研究领域发展较快,但总体处于概算式研究和模仿研究的初步阶段(李文华等, 2009; Zhang et al., 2010; Liu and Costanza., 2010; Yu and Bi, 2011)。

在全球气候变化和人类活动双重影响下,生态系统遭到破坏,生态系统产品和服务严重受损,这深刻影响到当代乃至后代的生存和经济社会的可持续发展。人类虽然已经意识到生态系统服务给予人类的惠益,但这不足以带来对生态系统服务实质性的认识。对生态系统服务价值的评估是提高人类认识生态系统服务的重要途径。生态系统服务价值评估涉及经济学、生态学、生物学、地理学、社会学等多学科交叉研究,通过生态系统服务的分类和价值量化,为管理者和决策者提供生态环境变化及驱动机制等有效信息,帮助他们制定合理的生态环境保护和经济协调发展政策。

从全球、区域性评估到单一的生态系统(森林、草地、湿地等)评估,各种尺度的生态系统服务价值评估工作相继展开。其中,中尺度的流域生态系统研究能够较好地与实际的生态系统管理衔接,也有助于生态系统退化问题的解决 (Trabucchi et al., 2012)。流域生态系统为人类提供各种服务:以丰富的水资源哺育人类、灌溉农田、净化环境;以广阔的水域维持生物多样性;以干、支流为联系纽带沟通全流域;以蕴藏的巨大水能为流域经济发展提供动力。然而,随着全球气候变化和人类活动干扰加剧,流域土地利用/覆盖发生变化,自然生态环境遭到破坏,水土流失加剧,生物多样性降低,河流湖库化、水体污染和富营养化等流域性问题越来越突出,已严重影响到流域生态系统服务(郑华等, 2003; 陈美球等, 2013; Watanabe and Ortega, 2013), 导致经济发展和生态保护之间的不

平衡 (Viglizzo and Frank, 2006)。开展流域尺度的生态系统服务价值评估,有助于深入认识流域水生态、水环境动态变化及其驱动机制,同时为流域水污染削减方案优化、流域生态补偿等方面提供科学依据。随着生态系统服务价值评估工作的深入,学者们和决策者认为生态系统服务固有的时空异质性对于评估结果的实际利用十分重要 (Bagstad et al., 2012; Schägner et al., 2013)。若无空间表达,仅仅是单一数值,很难展示服务价值的时空分布,也无法更有针对性地进行环境管理和政策制定。因此,对流域生态系统服务价值进行空间维度分析,可以为流域水环境综合管理提供更有针对性的政策制定依据。随着信息技术的发展,地理信息系统 (GIS) 凭借其强大的空间分析和信息处理能力已被成功运用于生态系统服务价值的空间评估。基于GIS的生态系统服务评估结果不仅能够直观地展示服务价值在特定尺度下的空间分布,更为公众及决策者理解生态系统服务价值提供可视化信息。

1.2 流域生态系统服务研究进展

1.2.1 生态系统服务的研究方法

从1997年, Daily出版的著作《Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystem》和Costanza等在《Nature》上发表的有关全球生态系统服务价值评估的文章开始,不同尺度、类型的生态系统的研究广泛开展,这不断推进了生态系统服务的研究,使得生态系统服务理论基础和方法模型不断夯实。

广义的生态系统服务包含了生态系统产品及服务,其中被广泛接受的定义是:生态系统服务是指生态系统能够生产、输送和维持一系列人类认为是重要的物质或服务,衡量生态系统服务价值的标准是人类可以从生态系统中获得惠益的多少。

生态系统服务存在不同的分类方法。其中,以Costanza、De Groot以及MA (千年生态系统评估小组) 的分类体系最具代表性, Costanza等将生态系统服务分为气体调节、水量供应、土壤形成、废物处理等17个子项; De Groot等 (2002) 将生态系统服务归结为调节功能、提供栖息地功能、生产功能和信息传递功能等四大类共23项子类; 联合国千年生态系统评估小组将生态系统服务分为供给服务、调节服务、文化服务和支持服务四大类,共25项子类,这些分类方法帮助理解了生态系统对人类的重要意义。这些分类方法也有其不足之处,它们的有些分类项混淆了生态系统过程和生态系统服务 (Wallace et al., 2007; Maler et al.,

2008),导致部分服务价值的重复计算,影响了评估结果的准确性。Ojea等(2012)阐述了影响分类的四个关键因素:(1)生态系统服务的定义多样,导致分类的不同;(2)生态系统服务价值评估主要参考MA,而该方法的缺点是有重复计算的风险;(3)文化、景观价值是属于生态系统服务价值还是属于生态现象的价值有所分歧;(4)评估中是否包含不可利用价值。

基于不同的空间尺度和评估目的,生态系统服务价值评估的方法有很多种,每一种方法都有其优点和适用性(Farber et al., 2002),但每类服务适用的方法通常只有一种或两种(Straton et al., 2006; De Groot et al., 2002)。生态系统服务评估方法归纳起来主要有市场价值法、替代市场法和假想市场法3大类,具体包括市场价格法、生产率变动法、享乐价格法、旅行费用法、支付意愿法、成本费用法和收益转移法等。从时空角度出发,生态系统服务价值评估还可以被分为静态评估和动态评估。静态评估的特点是淡化生态系统与外部系统间的作用机制,主要运用在全球、区域以及单个尺度的生态系统服务价值评估;而动态评估,考虑时空动态变化情况下服务价值受生态系统过程、尺度和不同受益者的影响,能更有针对性的权衡服务并制定可实施的保护利用方案,虽然不少学者已意识到动态评估的重要性,但动态评估工作的实践略显不足。

1.2.2 流域生态系统服务的研究动态

1.2.2.1 国内外研究概况

对国内外流域生态系统服务的研究案例进行了归纳汇总(表1-1)。

国际上,流域生态系统服务研究集中在欧洲、非洲和美洲,大多基于流域管理、土地/水资源利用、经济政策制定、公众教育等目的,评估流域水资源、水土保持、减轻灾害等各类流域生态系统服务价值(Loomis et al., 2000; Zedler, 2003; Wang et al., 2010; Logston and Chaubey, 2013),权衡分析经济服务和生态服务、流域上游保护与下游经济的关系(Pattanayak, 2004),探讨农业发展、土地利用变化和不同政策措施对流域生态系统服务价值的影响(Zedler, 2003; Viglizzo and Frank, 2006; Swallow et al., 2009; Garrick et al., 2009; Ooba et al., 2010; Rashleigh et al., 2012; Petz et al., 2012),并尝试采用直观的分类描述和评估结果以使公众更容易认识和理解所处生态系统的价值(Lewan and Soderqvist, 2002)。

国内方面,已有关于黑河、海河、淮河、黄河、太湖、洞庭湖、延河下游、玛纳斯河、石羊河、鄱阳湖和九龙江等流域生态系统服务价值评估的报道(王新

华等, 2004; 冯异星等, 2009; 张志国等, 2008; Chang et al., 2011; Wang et al., 2010; 龙鑫等, 2012), 研究重点是评估各种人类活动(土地利用变化、农业措施、水力发电等)对流域生态系统服务的影响, 流域生态系统服务与流域上下游补偿机制的关系(刘桂环等, 2010)。

表1-1 国内外流域生态系统服务价值评估：部分案例

Table 1-1 Summary on valuation of watershed ecosystem services: selected cases

国家	流域(河流、湿地)	研究目的	文献出处
美国	普拉特河流域	帮助公众正确选择和政策制定	Loomis et al., 2000
瑞典	斯堪尼流域	用非学术分类让公众更易理解和认知	Lewan et al., 2002
美国	Del Plata 流域	提出一个基于生态系统服务权衡分析的政策导向方法, 用于协调土地利用和避免潜在的边界问题	Viglizzo and Frank, 2006
瑞典	湿地、农田	修正 GDP	Gren et al., 2009
泰国	热带地区旱地流域	对热带地区旱地流域生态系统服务管理进行经验总结	Lebel et al., 2009
肯尼亚	Yala/Nyando 流域	为农村规划、农业投资和流域管理提供理论基础	Swallow et al., 2009
澳州	Tully-Murra 流域	构建一个简化的框架描述生态系统过程和功能并认清相关服务的提供者以及受益者	Pert et al., 2010
美国	Albemarle-Pamlic 流域	构建一个综合框架, 将各种模型综合起来, 用于预测流域水生态系统服务	Johnson et al., 2011
美国	明尼苏达河	寻找影响生态系统评估的重要不确定性因素	Johnson et al., 2012
地中海	地中海流域	用灵敏度分析方法探究 InVEST 模型对于三个主要系数变化的响应	Sánchez-Canales et al., 2012
荷兰	提萨河流域	研究该流域生态系统功能、合适的管理方式和支持单位各因素对生态系统服务持续供给的影响。	Petz et al., 2012
中国	陕西延河流域	评估黄土高原沟壑区退耕还林(草)引起的生态系统服务价值年际变化	张志国等, 2008
中国	玛纳斯河流域	分析土地利用变化对生态系统服务价值的影响	冯异星等, 2009
中国	福建九龙江流域	评估水电站对流域生态系统服务的影响	Wang et al., 2009
中国	鄱阳湖流域	评估生态系统服务的空间分布和动态变化	于秀波等, 2010

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库